饲喂不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马乳成分、乳脂脂肪酸组成和马驹生长发育、血浆生理生化指标的影响[1]

于全平[1]　王贤东[1]　漆雯雯[1]　祈居中[2]　马江飞[3]　方美烟[1]　陈　勇[1*]

（1.新疆农业大学动物科学学院，乌鲁木齐 830052；2.新疆伊犁哈萨克自治州昭苏县畜牧兽医局，昭苏 835600；3.伊犁哈萨克自治州昭苏马场，昭苏 835500）

摘　要：本试验旨在研究饲喂不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马乳成分、乳脂脂肪酸组成及马驹生长发育、血浆生理生化指标的影响，为进一步探讨伊犁马钙、磷营养提供参考。选取年龄、体重和胎次接近的处于第 2 泌乳月末的伊犁马 25 匹，根据母马体重和马驹体重随机分为 5 组，每组 5 匹。5 组马匹饲粮钙、磷水平分别设为 45.0、30.0 g/d（Ⅰ组），48.5、32.0 g/d（Ⅱ组），52.0、34.0 g/d（III组），55.5、36.0 g/d（Ⅳ组），59.0、38.0 g/d（Ⅴ组）。试验为期 90 d，每 30 d 为 1 个试验周期。结果显示：饲粮钙、磷水平显著影响每次平均挤奶量及估计日产奶量（P<0.05），对乳中乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和乳总固形物含量无显著影响（P>0.05）。III组每次平均挤奶量分别比Ⅰ和Ⅳ组提高了 20.65%（P<0.05）和 15.22%（P<0.05），而III组乳中钙含量比饲粮Ⅰ组低 21.54%（P<0.05）。不同钙、磷水平饲粮对乳脂中肉豆蔻脑酸（C14:1）、棕榈油酸（C16:1）、亚油酸（C18:2n6c）、花生酸（C20:0）、顺-11-二十碳烯酸（C20:1n9）和 α-亚麻酸（C18:3n3）的含量均有显著影响（P<0.05）；随着饲粮钙、磷水平的增加，乳脂中饱和脂肪酸含量增加而不饱和脂肪酸含量下降。母马饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹体重、体长、体高和管围等生长发育指标以及血浆钙、磷、甲状旁腺素、骨钙素含量均无显著影响（P>0.05），而胸围则随着饲粮钙、磷水平的增加有不同程度的下降。Ⅰ组马驹血浆降钙素含量显著高于Ⅱ、III和Ⅳ组（P<0.05），分别增加 34.24%、24.89%和 23.64%。由此得出，增加饲粮钙、磷水平可提高伊犁马的产奶量，但使乳中钙含量降低；饲粮钙、磷水平不影响乳成分，但增加乳脂中饱和脂肪酸的含量，减少不饱和脂肪酸的含量；由于乳中钙含量降低，导致马驹血浆降钙素含量下降、胸围发育较慢。

关键词：母马；钙；磷；乳成分；脂肪酸；马驹

收稿日期：2016-02-06
基金项目：国家科技支撑计划课题（2012BAD45B02）
作者简介：于全平（1989-），男，河北邯郸人，硕士研究生，从事草食动物营养与饲料的研究与开发。E-mail: 474643549@qq.com
*通信作者：陈　勇，教授，博士生导师，E-mail： xjaucy@163.com

中图分类号：S816　　　　　　　文献标识码：A　　　　　　　文章编号：

钙（calcium,Ca）和磷（phosphorus,P）是机体重要的常量矿物元素，在维持机体正常生命活动和健康过程中发挥着重要的作用。妊娠后期和泌乳期是机体对钙、磷需要量最大的生理阶段。奶牛缺乏钙、磷可引起机体代谢紊乱，导致奶牛出现产后瘫痪等营养性疾病，同时可使乳脂率下降、饲料利用率降低等[1]。研究发现，奶牛在分娩后 0~2 h 和 8~35 h 内补饲 2 次钙丸可明显提高产奶量[2]。泌乳早期奶牛的干物质采食量和产奶量在饲粮磷水平为 0.40%~0.42%时达到最大值，且不会随着饲粮磷水平的增加而增加[3]。饲粮磷水平对奶牛乳成分的影响还没有统一的结论，有研究发现增加饲粮磷水平可增加乳蛋白率和乳脂率，而另一些研究却得出了相悖的结果[4]。饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁马的产奶量和乳成分有何影响还不清楚。此外，有研究发现，当人每天补充 1 250 mg 钙 8 周后，血液中总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和载脂蛋白 B 的含量显著降低[5]；学龄前儿童每日摄入的钙越多体脂含量越低[6]。由此可见，饲粮中的钙具有调节机体脂类代谢的作用。饲粮钙、磷水平是否影响马乳脂中脂肪酸的组成还未见报道。鉴于此，本研究拟探讨不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马产奶量、乳成分、乳脂脂肪酸组成及马驹生长发育、血浆生理生化指标的影响，为进一步研究伊犁马钙、磷营养提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验动物与饲粮

选取无亲缘关系、年龄在 11～14 周岁、体重为（371±21） kg 的处于第 2 月泌乳月末的伊犁马 25 匹，根据母马体重和马驹体重随机分为 5 个试验组，每组 5 匹马。试验为期 90 d，其中预试期 12 d，每个泌乳月最后 12 d 为采样期。每 30 d 为 1 个试验周期。参照 NRC（2007）[7] 标准，按照成熟体重为 400 kg 泌乳马的标准配制 5 种不同钙、磷水平的饲粮。根据泌乳母马的营养需要特点，第 3 泌乳月精料饲喂量为 2 700 g/d，从第 4 泌乳月开始，粗饲料饲喂量保持不变，精料饲喂量减少 500 g/d 左右至第 5 泌乳月结束，以控制母马营养摄入水平。泌乳期母马饲粮组成及营养水平见表 1，马驹补充精料采用靳伟星等[8]报道的配方配制。

表 1　泌乳期母马饲粮组成及营养水平（饲喂基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of diets for mares during lactation (as-fed basis)　%

项目 Items	饲粮 Diet				
	I	II	III	IV	V
原料 Ingredients					
苜蓿干草 Alfalfa hay	41.905	41.872	41.838	41.804	41.770
小麦秸秆 Wheat straw	41.905	41.872	41.838	41.804	41.770
玉米 Corn	9.519	9.511	9.503	9.495	9.487
大麦 Barley	4.652	4.648	4.644	4.640	4.636
豆粕 Soybean meal	1.485	1.483	1.482	1.481	1.480

磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.168	0.233	0.299	0.364	0.430
石粉 Limestone		0.015	0.030	0.045	0.060
L-赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys•HCl	0.132	0.132	0.131	0.131	0.131
食盐 NaCl	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
预混料 Premix[1)]	0.162	0.162	0.163	0.164	0.164
合计 Total	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
营养水平 Nutrient levels[2)]					
第 3 泌乳月 The 3rd month of lactation					
消化能 DE/(MJ/d)	117.54	117.54	117.54	117.54	117.54
粗蛋白质 CP/(g/d)	1 502	1 502	1 502	1 502	1 502
赖氨酸 Lys/(g/d)	80.05	80.05	80.05	80.05	80.05
钙 Ca/(g/d)	45.03	48.50	51.96	55.43	58.89
总磷 TP/(g/d)	30.05	32.03	34.01	35.99	37.97
第 4 和第 5 泌乳月 The 4th and 5th month of lactation					
消化能 DE/(MJ/d)	111.47	111.47	111.47	111.47	111.47
粗蛋白质 CP/(g/d)	1 449	1 449	1 449	1 449	1 449
赖氨酸 Lys/(g/d)	74.72	74.72	74.72	74.72	74.72
钙 Ca/(g/d)	43.60	46.42	49.25	52.07	54.92
总磷 TP/(g/d)	27.63	29.24	30.86	32.47	34.12

[1)] 每千克预混料含有 One kg of premix contained the following：Co (as cobalt chloride) 18.5 mg，Cu (as copper sulfate) 3 7 g，I (as potassium iodide) 130 mg，Mn (as manganese sulfate) 14.8 g，Se (as sodium selenite) 37 mg，Zn (as zinc sulfate) 14.8 g，Fe (as ferrous sulfate) 18.5 g，VA 880 000 IU，VD 95 000 IU，VE 30 000 IU，VB_1 1 100 mg，VB_2 750 mg。

[2)] 营养水平均为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.2 饲养管理

试验母马采取分栏单独饲养，每天饲喂精料 2 次，即在 11:30 和 20:00 各饲喂 1/2，各泌乳月精料饲喂量见表 1。将苜蓿干草和小麦秸秆等量混合，采用混合机混合 30 min 以制备饲粮粗饲料。粗饲料每天饲喂 4 次，即在 09:30、13:30 和 18:00 各饲喂 3.00 kg，02:00 饲喂 5.00 kg。试验期间自由饮水。马驹在母马预试期期间自由摄取母乳，自由饮水和活动，每天每匹马驹分别在 10:00 和 18:00 时采用料兜补饲 0.30 kg 精料。

1.3 样品采集

1.3.1 母马乳样的采集

在试验期挤奶时，马驹栓系隔离以避免马驹摄取母乳。每日饲喂后 1.5 h 开始，每隔 2 h 由技术熟练的固定人员通过手工挤奶 1 次，每次挤尽为止。每天挤奶 4 次，每次以电子天平记录挤奶量。每个挤奶周期为连续采样 2 d 后停止 2 d，共 3 个挤奶周期。每次所挤马乳经 2 层纱布过滤去除杂质后，准确取 50 mL 放入-20 ℃冰箱冷冻保存。同一匹马 3 个挤奶周期的不同取样时间点所取样本混合为 1 个样品用于测定乳成分和乳脂脂肪酸组成。母马日产奶量根据靳伟星

等[8]的方法计算。

1.3.2　马驹血样的采集

在每期试验结束后的第 2 天晨饲前将马匹固定，采用肝素钠抗凝真空采血管从颈静脉采集空腹血液 10 mL，上下颠倒数次。采血后迅速经离心机 3 500 r/m 离心 10 min 分离血浆，并置-20 ℃冷冻保存待测。

1.4　测定指标

1.4.1　乳成分的测定

取 50 mL 乳样，充分摇匀后采用 Foss 4000 乳成分测定仪测定乳蛋白率、乳脂率、乳总固形物含量和乳糖率；采用 Foss 5000 体细胞计数仪测定体细胞数。

1.4.2　乳脂脂肪酸组成的测定

利用配置有 SP2560（100 m×0.25 mm×0.20 μm）色谱柱的气相色谱仪采用面积归一法测定马乳乳脂中各脂肪酸组分的相对百分含量。

粗脂肪的提取：取 1 mL 马乳，加入 2 mL 正己烷/异丙醇（体积比为 3:2），剧烈振荡 2 min，加入 1 mL 66.70 g/L 的 Na_2SO_4 溶液，剧烈振荡 2 min 后于 3 000 r/min 离心 10 min。

皂化与酯化：向上述正己烷相中加入 1 mL 2%的 NaOH 甲醇溶液，于 50 ℃皂化 15 min，冷却后加入 1 mL 10%的 HCl 甲醇溶液，于 80 ℃酯化 1 h。

分析试液的制备：待上述反应液冷却后加入去离子水 3 mL、正己烷 3 mL，振荡混匀后，静置 20 min，取上清液以正己烷定容至 10 mL，加入约 0.5 g 无水 Na_2SO_4 振荡 30 s，静置 10～20 min，取 1 mL 用于分析。

气相色谱的分析条件：进样口温度 250 ℃，柱流量 1.5 mL/min，进样量 1.0 μL，分流比 10:1；柱箱温度 100 ℃，保留 5 min，以 6 ℃升温至 150 ℃后再以 2 ℃升温至 240 ℃，并保留 8 min；氢火焰离子化检测器（FID）温度 260 ℃，尾吹流量 20 mL/min，空气流量 400 mL/min，氢气流量 30 mL/min。

1.4.3　马驹体重和体尺指标的测定

分别在试验前（2 月龄末）、3 月龄末、4 月龄末和 5 月龄末测定马驹的体重、体长、体高、胸围和管围[9]。

1.4.4　马驹血浆生理生化指标的测定

血浆中钙含量采用甲基香酚蓝比色法于 610 nm 处测定，血浆中磷含量采用钼蓝比色法于 340 nm 处测定，血浆中甲状旁腺素(parathyroid hormone,PTH)、降钙素(calcitonin,CT)、骨钙素(bone gla protein,BGP)等钙离子（Ca^{2+}）代谢相关激素的含量均采用放射免疫法测定。指标测定所用所试剂盒均由北京华英生物技术研究所提供。

1.5　数据处理与统计分析

数据采用 Excel 2010 进行整理。采用 SPSS 18.0 统计软件中的多因素单响应变量方差分析进行统计分析，数据模型为 X_{ij}=μ+α_i+β_j+α_i×β_j+ε_{ij}，其中 X_{ij} 为观察值，μ 为总体均值，α_i（i=1，2,3,4,5）为饲粮效应，β_j（j=1，2，3）为母马泌乳月份（或马驹月龄）效应，α_i×β_j 为饲粮与母马泌乳月份（或马驹月龄）的互作效应，ε_{ij} 为误差。当因素水平达到显著后采用 Duncan 氏法对组间进行多重比较。数据均以平均值±标准差(±SD）表示，差异显著水平为 P≤0.05，有差异显著趋势为 0. 05<P≤0. 10。

2 结果与分析

2.1 不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马产奶量及乳成分的影响

由表 2 可知，不同钙、磷水平饲粮对母马泌乳期每次平均挤奶量、估计日产奶量和乳中钙含量均有显著影响（P<0.05），对乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和乳总固形物含量均无显著影响（P>0.05），饲粮与母马泌乳月份对上述各指标均无显著的互作效应（P>0.05）。III组每次平均挤奶量最高，分别比I和IV组提高了 20.65%（P<0.05）和 15.22%（P<0.05）；估计日产奶量与每次平均挤奶量变化规律相同。随着饲粮钙、磷水平的增加，乳中钙含量并未呈现线性增加，相反，II、III和IV组乳中钙含量显著低于I组（P<0.05），分别降低 15.38%、21.54%和 16.92%。乳中磷含量有随着饲粮磷水平的增加而增加的趋势（P<0.10）。泌乳月份对乳中各成分有显著影响（P<0.05）。随着泌乳月份的增加，每次平均挤奶量、估计日产奶量、体细胞数、乳中钙和磷含量均有不同程度降低，而乳成分中其他指标均随泌乳月份的增加则有不同程度增加。

2.2 不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马乳脂脂肪酸组成的影响

由表 3 可知，在马乳乳脂中共检测出 27 种脂肪酸，其中癸酸（C10:0）、月桂酸（C12:0）、肉豆蔻酸（C14:0）、棕榈油酸（C16:1）和 α-亚麻酸（C18:3n3）5 种脂肪酸含量超过 5%；棕榈酸（C16:0）、油酸（C18:1n9*c*）和亚油酸（C18:2n6*c*）等 3 种脂肪酸含量超过 10%。不同钙、磷水平饲粮对乳脂中肉豆蔻脑酸（C14:1）、棕榈油酸、亚油酸、花生酸（C20:0）、顺-11-二十碳烯酸（C20:1n9）和 α-亚麻酸含量均有显著影响（P<0.05），而对丁酸（C4:0）等 21 种脂肪酸含量均无显著影响（P>0.05）。随着饲粮钙、磷水平的增加，乳脂中肉豆蔻脑酸和棕榈油酸含量逐渐降低并在III组达到最低值，之后再逐渐升高。饲粮I组乳中亚油酸的含量显著高于其他各组（P<0.05），而花生酸和顺-11-二十碳烯酸含量显著低于其他各组（P<0.05）。V组乳脂中 α-亚麻酸的含量显著低于I和III组（P<0.05）。随着饲粮钙、磷水平的增加，乳脂中饱和脂肪酸含量增加，而不饱和脂肪酸含量降低；III组乳脂中单不饱和脂肪酸含量和V组乳脂中多不饱和脂肪酸含量显著低于其他各组（P<0.05）。从泌乳月份来看，随着泌乳月份的增加，乳脂中丁酸、癸酸、十一烷酸（C11:0）、月桂酸、十三烷酸（C13:0）、顺-8,11,14-二十碳三烯酸（C20:3n6）和二十四烷酸（C24:0）的含量均不同程度下降，肉豆蔻酸、肉豆蔻脑酸、十五烷酸（C15:0）和棕榈酸的含量则呈现先降低后升高的现象，而油酸和 α-亚麻酸的含量则有先升高再降低的变

化规律。乳脂中亚油酸含量则随着泌乳月份的增加不断增加，顺-11-二十碳烯酸含量也以第 3 泌乳月最低。饲粮和泌乳月份对乳脂中亚油酸、顺-11,14-二十碳二烯酸（C20:2）、二十四烷酸和神经酸（C24:1）的含量均有显著的互作效应（*P*<0.05）。

2.3 伊犁马泌乳期饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹生长发育的影响

由表 4 可知，母马饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹体重、体长、体高和管围均无显著影响（*P*>0.05），而除III组外增加饲粮钙、磷水平显著降低胸围（*P*<0.05）。随着月龄的增加，马驹各生长发育指标均显著增加（*P*<0.05）。饲粮与马驹月龄对马驹各生长发育指标均无显著的互作效应（*P*>0.05）。

2.4 伊犁马泌乳期饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹血浆生理生化指标的影响

由表 5 可知，母马饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹血浆钙、磷、PTH 和 BGP 含量均无显著影响（*P*>0.05），对血浆 CT 含量有显著影响（*P*<0.05），表现为Ⅰ组显著高于Ⅱ、III和Ⅳ组（*P*<0.05）。月龄对马驹各血浆生理生化指标均有显著影响（*P*<0.05），其中血浆钙、磷、CT 和 BGP 含量随月龄的增加均呈现先升高再降低的变化规律，在 4 月龄时最高；而血浆 PTH 含量则随月龄的增加先降低后升高，在 4 月龄时最低。此外，饲粮与马驹月龄对血浆钙、PTH 和 CT 含量有显著的互作效应（*P*<0.05）。

表 2　不同钙、磷水平饲粮对伊犁马产奶量及乳成分的影响

Table 2　Effects of different levels of calcium and phosphorus diets on milk yield and milk composition of *Yili* mares during lactation period

项目 Items	饲粮 Diets					泌乳月份 Months of lactation			*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	3rd	4th	5th	D	ML	D*ML
每次平均挤奶量 Average milking volume each time/(kg/次)	0.73±0.12^{c}	0.83±0.14^{ab}	0.92±0.18^{a}	0.78±0.16^{bc}	0.91±0.14^{a}	0.92±0.15^{a}	0.88±0.15^{a}	0.71±0.11^{b}	<0.001	<0.001	0.946
估计日产奶量 Estimated daily milk yield/(kg/d)	8.80±1.48^{c}	9.97±1.64^{ab}	10.98±2.16^{a}	9.39±1.85^{bc}	10.95±1.72^{a}	10.99±1.78^{a}	10.52±1.80^{a}	8.54±1.28^{b}	<0.001	<0.001	0.945
乳脂肪率 Milk fat percentage/%	0.89±0.25	0.93±0.29	0.92±0.23	0.84±0.26	0.85±0.25	0.66±0.19^{c}	0.93±0.17^{b}	1.07±0.19^{a}	0.690	<0.001	0.976
乳蛋白率 Milk protein percentage/%	1.58±0.21	1.64±0.14	1.62±0.12	1.60±0.21	1.62±0.14	1.53±0.18^{b}	1.66±0.13^{a}	1.64±0.16^{a}	0.860	0.025	0.991
乳糖率 Lactose percentage/%	7.08±0.10	7.01±0.24	7.06±0.20	7.05±0.18	6.96±0.19	6.93±0.18^{b}	7.07±0.11^{a}	7.10±0.22^{a}	0.390	0.003	0.856
乳总固形物含量 Milk total solid content/%	11.18±0.32	11.18±0.41	11.21±0.42	11.11±0.37	11.06±0.34	10.79±0.32^{b}	11.25±0.19^{a}	11.39±0.27^{a}	0.588	<0.001	0.928
体细胞数 Somatic cell count/(×10^{3}/mL)	49.13±39.34	80.33±72.54	34.27±30.47	45.20±30.01	65.40±63.71	82.04±64.92^{a}	61.00±41.32^{a}	21.56±18.45^{b}	0.064	<0.001	0.959
乳中钙含量 Milk Ca content/%	0.065±0.019^{a}	0.055±0.012^{bc}	0.051±0.012^{c}	0.054±0.011^{bc}	0.061±0.010^{ab}	0.067±0.009^{a}	0.059±0.015^{b}	0.046±0.008^{c}	0.001	<0.001	0.054
乳中磷含量 Milk P content/%	0.036±0.008	0.038±0.007	0.037±0.006	0.036±0.008	0.041±0.007	0.044±0.005^{a}	0.036±0.006^{b}	0.032±0.007^{c}	0.095	<0.001	0.605

D：饲粮效应；ML：泌乳月份效应；D*ML：饲粮与泌乳月份组合效应。同行同一指标数据肩标不同字母表示差异显著（P≤0.05）。下表同。

D: effect of diet; ML: effect of lactation month; D*ML: combination effect of diet and lactation month. Values of the same item in the same row with different letter superscripts mean significant difference (P≤0.05). The same as below.

表 3　不同钙、磷水平饲粮对伊犁马乳脂脂肪酸组成的影响

Table 3　Effects of different levels of calcium and phosphorus diets on fatty acid composition in milk fat of *Yili* mares during lactation period　%

脂肪酸	饲粮 Diets					泌乳月份 Months of lactation			*P* 值 *P*-value		
Fatty acids	I	II	III	IV	V	3rd	4th	5th	D	ML	D*ML
C4:0	0.08±0.01	0.07±0.01	0.07±0.01	0.07±0.02	0.07±0.02	0.08±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}	0.06±0.01^{b}	0.205	0.002	0.302
C6:0	0.13±0.01	0.14±0.02	0.14±0.03	0.15±0.05	0.14±0.03	0.14±0.04	0.15±0.03	0.14±0.03	0.402	0.629	0.970
C8:0	1.91±0.37	2.07±0.33	2.24±0.36	2.24±0.48	2.26±0.54	2.20±0.49	2.20±0.39	2.04±0.41	0.144	0.342	0.996
C10:0	4.95±1.16	5.26±0.84	5.74±0.80	5.73±1.02	5.87±1.11	6.06±1.11^{a}	5.37±0.85^{b}	5.09±0.89^{b}	0.053	0.002	0.983
C11:0	0.05±0.02	0.05±0.02	0.04±0.02	0.05±0.02	0.05±0.01	0.07±0.02^{a}	0.04±0.01^{b}	0.04±0.01^{b}	0.610	<0.001	0.988
C12:0	7.32±1.39	7.58±0.96	7.76±0.87	7.91±1.26	8.18±1.08	8.51±1.16^{a}	7.36±0.87^{b}	7.37±0.99^{b}	0.203	<0.001	0.682
C13:0	0.28±0.06	0.29±0.06	0.24±0.03	0.26±0.05	0.27±0.05	0.29±0.05^{a}	0.26±0.05^{ab}	0.25±0.05^{b}	0.147	0.061	0.927
C14:0	8.35±1.13	8.32±0.78	8.42±0.69	8.51±0.90	8.74±0.72	9.02±0.80^{a}	7.91±0.60^{c}	8.48±0.75^{b}	0.492	<0.001	0.171
C14:1	1.04±0.20^{a}	0.99±0.20^{a}	0.83±0.07^{b}	0.92±0.17^{ab}	0.98±0.11^{a}	1.00±0.13^{a}	0.90±0.17^{b}	0.96±0.19^{ab}	0.007	0.085	0.728
C15:0	0.42±0.06	0.48±0.18	0.40±0.04	0.41±0.03	0.42±0.05	0.45±0.11^{a}	0.39±0.07^{b}	0.43±0.08^{ab}	0.153	0.042	0.995
C16:0	24.03±1.56	25.04±0.96	24.96±1.13	24.41±1.33	24.65±1.56	24.63±1.43^{b}	23.90±1.06^{c}	25.33±1.16^{a}	0.134	<0.001	0.303
C16:1	8.03±0.88^{a}	7.99±0.83^{a}	6.99±0.68^{b}	7.54±1.02^{ab}	8.19±1.15^{a}	7.65±0.90	7.73±0.97	7.86±1.15	0.007	0.753	0.764
C18:0	0.89±0.13	0.87±0.10	1.01±0.27	0.95±0.13	0.91±0.13	0.90±0.11	0.92±0.13	0.96±0.24	0.135	0.426	0.275
C18:1n9*c*	20.82±2.75	20.87±2.03	20.75±1.30	20.74±1.67	19.59±1.16	19.85±1.69^{b}	21.45±1.63^{a}	20.36±2.00^{b}	0.268	0.009	0.891
C18:2n6*c*	12.57±1.98^{a}	11.43±0.89^{b}	11.45±1.16^{b}	11.39±1.59^{b}	11.49±1.07^{b}	11.13±1.83^{b}	11.55±1.07^{b}	12.31±1.02^{a}	0.030	0.002	0.002
C18:3n3	7.98±1.23^{a}	7.47±0.66^{ab}	7.82±1.01^{a}	7.53±1.41^{ab}	7.09±1.00^{b}	6.88±0.74^{b}	8.66±0.86^{a}	7.19±0.76^{b}	0.017	<0.001	0.256
C20:0	0.04±0.01^{b}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.005	0.280	0.359
C20:1n9	0.26±0.06^{b}	0.31±0.04^{a}	0.30±0.03^{a}	0.30±0.03^{a}	0.29±0.03^{a}	0.27±0.04^{b}	0.31±0.04^{a}	0.31±0.04^{a}	0.002	0.001	0.916
C20:2	0.33±0.17	0.25±0.03	0.26±0.04	0.27±0.05	0.26±0.03	0.28±0.14	0.26±0.04	0.28±0.04	0.067	0.721	0.011
C20:3n6	0.05±0.02	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{b}	0.05±0.01^{b}	0.729	0.010	0.787
C20:3n3	0.26±0.09	0.22±0.06	0.25±0.03	0.33±0.19	0.24±0.05	0.24±0.07	0.28±0.15	0.25±0.01	0.072	0.455	0.904
C20:4n6	0.06±0.01	0.07±0.06	0.06±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.06±0.05	0.05±0.01	0.06±0.01	0.595	0.900	0.533
C20:5	0.04±0.1	0.01±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01	0.04±0.08	0.02±0.01	0.02±0.01	0.509	0.229	0.379

C21:0	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.876	0.043	0.790
C22:6n3	0.02±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.02±0.01	0.03±0.01	0.02±0.00	0.03±0.01	0.987	0.441	0.759
C24:0	0.04±0.07	0.02±0.02	0.02±0.02	0.03±0.02	0.02±0.01	0.05±0.05[a]	0.01±0.01[b]	0.01±0.01[b]	0.173	<0.001	0.049
C24:1	0.03±0.04	0.03±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.03±0.03	0.03±0.01	0.02±0.01	0.225	0.141	0.029
SFA	48.52±4.21[b]	50.29±2.63[ab]	51.16±2.86[a]	50.80±3.38[a]	51.70±2.54[a]	52.49±3.49[a]	48.67±2.48[c]	50.31±2.72[b]	0.025	<0.001	0.187
USFA	51.48±4.21[a]	49.71±2.63[ab]	48.84±2.86[b]	49.20±3.38[b]	48.30±2.54[b]	47.51±3.49[c]	51.33±2.48[a]	49.69±2.72[b]	0.025	<0.001	0.187
MUSFA	9.10±1.03[a]	9.00±1.01[a]	7.84±0.71[b]	8.48±1.17[ab]	9.20±1.21[a]	8.68±1.00	8.65±1.12	8.84±1.30	0.005	0.811	0.768
PUSFA	39.87±5.37[a]	38.28±4.95[ab]	38.70±5.45[ab]	38.61±6.60[ab]	36.99±5.32[b]	38.83±3.56[c]	42.67±2.62[a]	40.85±2.99[b]	0.047	<0.001	0.058

SFA：饱和脂肪酸 saturated fatty acids；USFA：不饱和脂肪酸 unsaturated fatty acids；MUSFA：单不饱和脂肪酸 monounsaturated fatty acids；PUSFA：多不饱和脂肪酸 polyunsaturated fatty acids。

表 4　伊犁马泌乳期饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹生长发育的影响

Table 4　Effects of *Yili* mares fed with different levels of calcium and phosphorus diets during lactation period on growth and development of foals

项目 Items	饲粮 Diets					月龄 Months of age				*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	2nd	3rd	4th	5th	D	MA	D*MA
体重 Body weight/kg	136.4±13.4	122.6±25.2	129.4±26.0	119.6±23.8	123.7±33.8	98.8±15.7^{d}	116.8±18.2^{c}	131.0±17.1^{b}	154.5±19.2^{a}	0.251	<0.001	0.998
体长 Body length/cm	106.95±7.58	102.49±6.07	106.27±7.84	103.66±7.98	104.00±11.54	98.34±5.68^{c}	101.94±6.53^{bc}	105.18±6.26^{b}	113.23±7.10^{a}	0.187	<0.001	0.994
体高 Body height/cm	116.65±4.38	115.85±5.52	117.97±5.30	115.57±6.43	117.08±7.18	111.99±4.75^{c}	115.54±4.31^{b}	118.83±4.27^{a}	120.13±6.11^{a}	0.595	<0.001	0.982
胸围 Chest girth/cm	119.40±7.89^{a}	114.46±8.42^{b}	116.43±8.41^{ab}	112.68±8.52^{b}	115.11±10.65^{b}	107.69±7.05^{d}	111.70±5.58^{c}	118.44±6.66^{b}	124.62±5.50^{a}	0.016	<0.001	0.996
管围 Circumference of cannon/cm	15.02±0.94	14.83±1.04	14.97±0.91	14.68±0.78	14.63±0.99	14.06±0.73^{d}	14.49±0.66^{c}	14.97±0.63^{b}	15.78±0.71^{a}	0.333	<0.001	0.978

MA：马驹月龄效应；D*MA：母马饲粮与马驹月龄的组合效应。下表同。

MA: effects of foals' month age; D*MA; combination effect of mares' diets and foals' month age. The same as below.

表 5　伊犁马泌乳期饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹血浆生理生化指标的影响

Table 5　Effects of *Yili* mares fed with different levels of calcium and phosphorus diets during lactation period on plasma physiological-biochemical indices of foals

项目 Items	饲粮 Diets					月龄 Months of age			*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	3rd	4th	5th	D	MA	D*MA
钙 Ca/(mmol/L)	1.11±0.33	1.09±0.26	1.01±0.20	1.01±0.19	1.17±0.45	0.98±0.29^{b}	1.21±0.30^{a}	1.05±0.27^{b}	0.417	0.009	0.007
磷 P/(mmol/L)	0.90±0.15	0.79±0.25	0.84±0.14	0.84±0.19	0.90±0.23	0.74±0.20^{b}	0.94±0.16^{a}	0.89±0.17^{a}	0.396	0.001	0.335
甲状旁腺素 PTH/(ng/L)	41.12±23.14	44.56±25.99	55.13±39.47	44.76±35.19	49.67±31.28	53.74±31.50^{a}	32.78±20.71^{b}	54.62±35.26^{a}	0.601	0.005	<0.001
降钙素 CT/(ng/L)	68.90±28.92^{a}	44.62±21.17^{b}	51.75±17.60^{b}	52.61±22.94^{b}	57.32±24.11^{ab}	49.81±22.51^{b}	68.49±22.39^{a}	46.82±21.96^{b}	0.023	<0.001	0.035
骨钙素	5.18±0.72	5.18±0.62	4.75±0.58	4.86±0.53	5.00±0.58	4.68±0.56^{b}	5.35±0.44^{a}	4.96±0.66^{b}	0.165	<0.001	0.931

BGP/(mg/L)

3 讨 论

3.1 不同钙、磷水平饲粮对伊犁马产奶量及乳成分的影响

家畜产奶量及乳成分受品种、遗传、生理、饲养管理、饲粮和环境等因素的影响，在遗传、生理和环境因素相同的条件下，饲养管理或饲粮对产奶量、乳成分起着主导作用[10-11]。钙和磷广泛分布于骨骼、肌肉和牙齿中。钙与神经传导、细胞通透性、酶活性和血液凝固等生理过程有关；磷则在骨骼形成、生物能量和微生物消化等过程中起重要作用。家畜在分娩后通过饲粮、机体骨钙和肾小球对钙的重吸收来维持血钙和乳钙的恒定。当钙源不足时，会导致血钙降低而影响产奶量[2]。给处于泌乳高峰期的奶牛连续 3 d 补充 8.5 g/d 离子钙，产奶量可提高 1.6 kg/d，并明显延长奶牛产奶高峰期[12]。给产奶量高于平均水平 105%的奶牛在分娩后 0~2 h 和 8~35 h 内补饲 2 次钙丸，产奶量增加 7.2%~7.7%[2]。Lopez 等[13]报道，给荷斯坦奶牛饲喂含磷为 0.37%或 0.57%饲粮并观察 165 d，结果发现饲粮磷水平对产奶量、乳脂率及乳蛋白率等乳成分均无显著影响。赵恒聚等[14]也发现，给奶牛饲喂磷水平为 0.32%、0.44%和 0.56%的饲粮对奶牛的产奶量无显著影响。这表明，额外添加钙有助于提高奶牛的产奶量，而磷的作用并不明显。饲粮钙、磷水平对马的产奶量及乳成分有何影响还未见报道。研究发现，母马在分娩前 3 天和分娩后 2 天之间时，血液中 PTH 含量升高而总钙和离子钙含量下降，因此在马泌乳期间有必要提高钙的供应水平[7]。成熟体重为 400~500 kg 的母马处于第 2 泌乳月时，钙、磷的需要量分别为 47.1~58.9 g/d 和 30.5~38.1 g/d[7]。在本研究中，处于第 2 泌乳月的伊犁马钙、磷饲喂水平分别为 45.0~58.9 g/d 和 30.0~38.0 g/d，结果发现饲粮钙、磷水平分别为 51.96 和 34.01 g/d 时产奶量最高，进一步增加饲粮钙、磷水平对产奶量并无益处。生理阶段是影响马产奶量的另一个重要因素。与奶牛泌乳期不同，马的泌乳期约为 180 d；而新疆伊犁马马驹通常在 5 月龄时断奶，马驹断奶后母马的产奶量急剧下降并进入干奶期。姚新奎[15]的研究表明，随着泌乳期的延长，新吉马产奶量先高后低，产驹后 30 d 时产奶量最高，为 19.13 kg/d，110 d 时为 14.05 kg/d，其后急剧下降，150 d 时为 10.51 kg/d；伊犁马在泌乳前 110 d 相对平稳，产驹后 60 d 时产奶量最高，为 12.78 kg/d，110 d 时为 10.75 kg/d，到 140 d 时仅为 7.51 kg/d；而卢西塔诺（Lusitano）马在产后第 31 天达到泌乳高峰，为 14.0 kg/d，之后开始逐渐下降，到 180 d 时产奶量下降到 7.57 kg/d[11]。在本研究中，伊犁马第 3 泌乳月末的估计产奶量为 10.99 kg/d，之后不断下降，到第 5 泌乳月末时为 8.54 kg/d。由此可见，适宜的饲粮钙、磷水平有增加产奶量的作用，但随着泌乳期的延长，产奶量逐步下降；泌乳阶段不同，马的产奶性能也存在明显差异。

有关饲粮钙、磷水平对马乳成分影响的报道较少，崔政安[16]的研究表明不同钙、磷水平饲粮对泌乳水牛的乳成分影响不显著，这与本研究的结果相似。张巧娥等[17]对产奶量与乳成分进行回归分析表明，产奶量与乳脂率、体细胞数和干物质含量呈显著的负相关。对马的研究则表明产奶量与乳脂率存在极强的正相关关系，与乳蛋白率无相关关系，与乳总固形物含量存在极

强的负相关关系[15]。但在本研究中并未发现产奶量与乳成分间存在显著的相关关系，这可能与试验时间仅局限于第 3 至第 5 泌乳月有关。

3.2　不同钙、磷水平饲粮对伊犁马乳脂脂肪酸组成的影响

饲粮中 Ca^{2+}对脂肪的消化和代谢具有重要影响。Ca^{2+}可在消化道与脂类形成皂钙而影响脂类的吸收；同时 Ca^{2+}还可与胆酸结合，增加胆酸的排泄并减少胆固醇的形成[5]。在大鼠中的研究表明，饲粮中高水平的 Ca^{2+}可使体脂分解增加 5.2 倍[18]。究其原因是由于低 Ca^{2+}饲粮导致 Ca^{2+}代谢相关激素[PTH 和 1,25-$(OH)_2$-维生素 D]合成增加，使 Ca^{2+}向细胞流入，导致脂肪细胞内 Ca^{2+}含量升高，提高脂肪酸合成酶的表达和活性，进而增加脂类贮存；而高 Ca^{2+}饲粮抑制细胞对 Ca^{2+}代谢相关激素的反应。增加膳食 Ca^{2+}水平会通过降低细胞内 Ca^{2+}含量，增加脂解并减少甘油三酯的累积[19]。有关饲粮钙水平对马乳脂率有何影响还未见报道。在本研究中，不同饲粮组间乳脂率并无显著变化，这可能与机体在短期内维持乳成分相对稳定的机制有关。从第 3 泌乳月到第 5 泌乳月，饲粮钙水平逐渐降低，而乳脂率则持续增加。这一现象可能与产奶量降低和低 Ca^{2+}引发脂质合成增加有关。饲粮钙、磷水平对乳脂脂肪酸组成有何影响还未见报道。在本研究中，不同钙、磷水平饲粮对乳脂中肉豆蔻脑酸、棕榈油酸、亚油酸、花生酸、顺-11-二十碳烯酸、α-亚麻酸以及饱和脂肪酸、不饱和脂肪的含量均有显著影响。这是否是由于饲粮 Ca^{2+}改变机体脂质代谢的结果还不清楚，有待进一步研究。

3.3　伊犁马泌乳期饲喂不同钙、磷水平饲粮对马驹生长发育和血浆生理生化指标的影响

体重和体尺是反映动物生长发育的重要指标，马驹一般在 6 月龄时断奶，从出生到 6 月龄是马驹一生中生长发育最快的阶段，体重和体尺占生后总生长量的 50%以上[9]。当给处于泌乳后期的伊犁母马饲喂粗蛋白质和消化能水平较高的饲粮后可明显提高马驹体长发育速度，母马产奶量增加可能是提高马驹生长发育的重要原因[20]。在本试验中，各组马驹补饲的精料相同，补饲量也相同，因此，马驹的生长发育与母马的产奶量有关。虽然各组间母马的产奶量存在显著差异，但各组马驹除胸围外，其他生长发育指标均无显著差异。这可能与样本量较小有关。研究发现，关中母驴在胎儿期和生后期生长发育都很快，其中胸围的生长强度比体高、管围大[21]。这表明，胸围的生长更易受摄入营养水平的影响。

血清中钙、磷代谢受 PTH、CT 和 1,25-$(OH)_2$-维生素 D 三者共同调节，以维持相对恒定的水平。当膳食中 Ca^{2+}水平降低时，机体增加 PTH 和 1,25-$(OH)_2$-维生素 D 的释放而减少 CT 的释放[19]。在本研究中，各组马驹血浆中钙和磷含量虽然无显著差异，但饲喂饲粮II、III和IV的母马其乳中钙含量显著低于饲喂饲粮I的母马，致使马驹从母乳中获得的钙偏低，这可能是导致II、III和IV组马驹血浆中 CT 含量显著低于I组的原因。

4　结　论

增加饲粮钙、磷水平可提高伊犁马的产奶量，但使乳中钙含量降低；饲粮钙、磷水平不影

响乳成分，但增加乳脂中饱和脂肪酸的含量，减少不饱和脂肪酸的含量；由于乳中钙含量降低，导致马驹胸围发育较慢，血浆 CT 含量下降。

参考文献：

[1] 初汉平.不同泌乳阶段对荷斯坦牛干物质采食量和钙磷消化率的影响[J].饲料工业,2011,32(5):39–41.

[2] OETZEL G R,MILLER B E.Effect of oral calcium bolus supplementation on early-lactation health and milk yield in commercial dairy herds[J].Journal of Dairy Science,2012,95(12):7051–7065.

[3] WU Z,SATTER L D,SOJO R.Milk production,reproductive performance,and fecal excretion of phosphorus by dairy cows fed three amounts of phosphorus[J].Journal of Dairy Science,2000,83(5):1028–1041.

[4] (美)国家科学研究委员会组织.奶牛营养需要[M].孟庆祥,译.北京:中国农业大学出版社,2002.

[5] SHIDFAR F,MOGHAYEDI M,KERMAN S R J,et al.Effects of a calcium supplement on serum lipoproteins,apolipoprotein B,and blood pressure in overweight men[J].Kowsar Corp,2010,8(4):194–200.

[6] CARRUTH B R,SKINNER J D.The role of dietary calcium and other nutrients in moderating body fat in preschool children[J].International Journal of Obesity,2001,25(4):559–566.

[7] NRC.Nutrient requirements of horses[S].6th rev ed.Washington,D.C.:National Academies Press,2007:1–300.

[8] 靳伟星,邓海峰,张浩,等.不同日粮蛋白能量水平对伊犁马产奶性能和乳成分的影响[J].中国草食动物科学,2014,34(6):29–35.

[9] 姚新奎,韩国才.马生产管理学[M].北京:中国农业大学出版社,2008:281–282.

[10] 马燕芬.影响奶牛产奶量的因素[J].中国奶牛,2007(11):20–22.

[11] SANTOS A S,SILVESTRE A M.A study of Lusitano mare lactation curve with wood's mode-l[J].Journal of Dairy Science,2008,91(2):760–766.

[12] 杨勇,张岭,丁秀文,等.钙剂对盛产期奶牛产奶量的影响[J].现代农业,2013(6):84–85.

[13] LOPEZ H,KANITZ F D,MOREIRA V R,et al.Effect of dietary phosphorus on performance of lactating dairy cows:milk production and cow health[J].Journal of Dairy Science,2004,87(1):139–145.

[14] 赵恒聚,高艳霞,李秋凤,等.日粮磷水平对泌乳奶牛生产性能及磷排放的影响[J].中国农业科学,2011,44(22):4687–4693.

[15] 姚新奎.伊犁马、新吉马及其杂交马乳理化指标、泌乳特性初步研究[D].博士学位论文.乌鲁木齐:新疆农业大学,2011:1–92.

[16] 崔政安.泌乳水牛钙、磷代谢规律及需要量研究[D].硕士学位论文.南宁:广西大学,2011:1–65.

[17] 张巧娥,吴学荣,马水鱼,等.奶牛产奶量与乳成分的多元回归分析[J].江西农业大学学报,2011,33(1):112–116.

[18] ZEMEL M B,SHI H,GREER B,et al.Regulation of adiposity by dietary calcium[J].The FASEB Journal,2000,14(9):1132–1138.

[19] ZEMEL M B.Proposed role of calcium and dairy food components in weight management and metabolic health[J].The Physician and Sportsmedicine,2009,37(2):29–39.

[20] 王贤东,邓海峰,李海,等.伊犁马泌乳后期饲喂不同粗蛋白质消化能水平日粮对马驹生长发

育和血液生化指标的影响[J].中国畜牧兽医,2015,42(5):1137–1144.

[21] 侯文通,卢文龙.关中驴生长发育的初步研究[J].畜牧兽医杂志,1983(1):26–33.

Effects of Feeding Different Levels of Calcium and Phosphorus Diets to *Yili* Mares during Lactation Period on Milk Composition and Fatty Acid Composition of Milk Fat, and Growth Development and Plasma Physiological-Biochemical Indices of Foals

YU Quanping[1] WANG Xiandong[1] QI Wenwen[1] QI Juzhong[2] MA Jiangfei[3] FANG Meiyan[1] CHEN Yong[1*]

（1. *College of Animal Sciences*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*; 2. *Animal husbandry and Veterinary Bureau of Zhaosu County*, *Yili Kazak Autonomous*, *Zhaosu* 835600, *China*; 3. *Yili Kazak Autonomous Prefecture of Zhaosu Racecourse*, *Zhaosu* 835500, *China*）

Abstract: The objective of this study was to evaluate the effects of feeding different levels of calcium (Ca) and phosphorus (P) diets to *Yili* mares during lactation period on milk composition and fatty acid composition of milk fat, and growth development and plasma physiological-biochemical indices of foals, in order to provide references for further understand nutrition of Ca and P for *Yili* mares. Twenty-five *Yili* mares in their end of second lactation month with similar age, body weight (BW) and parity were selected, and divided into five groups randomly according to the BW of mares and foals, each group with 5 mares. Dietary Ca and P levels of the five groups were 45.0 and 30.0 g/d (group I), 48.5 and 32.0 g/d (group II), 52.0 and 34.0 g/d (group III), 55.5 and 36.0 g/d (group IV), 59.0 and 38.0 g/d (group V), respectively. The trial lasted for 90 days, and every 30 days for a test cycle. The results showed as follows: dietary Ca and P levels significantly affected the average milking volume each time and estimated daily milk yield ($P<0.05$), but there were no significant differences among groups for milk fat percentage, milk protein percentage, lactose percentage and milk total solid content ($P>0.05$). Compared with groups I and IV, average milking volume each time of group III was significantly increased by 20.65% ($P<0.05$) and 15.22% ($P<0.05$). Subsequently, milk Ca content of group III was lower 21.54% than that of group I ($P<0.05$). Meanwhile, the contents of some fatty acids, such as myristoleic acid (C14:1), palmitoleate (C16:1), linoleate (C18:2n6*c*), arachidate (C20:0), *cis*-11-eicosenoate (C20:1n9) and linolenate (C18:3n3) in milk fat, were significantly affected by different levels of dietary Ca and P diets ($P<0.05$). Along with the increase of dietary Ca and P levels, the content of saturated fatty acid (SFA) in milk fat was increased while the content of unsaturated

*Corresponding author, professor, E-mail: xjaucy@163.com

（责任编辑　菅景颖）

fatty acid (USFA) was decreased (*P*<0.05). Growth and development indexes (BW, body length, body height and circumference of cannon) and the contents of plasma Ca, P, parathyroid hormone (PTH) and bone Gla protein (BGP) of foals showed no significant difference when mares fed with different levels of dietary Ca and P diets (*P*>0.05). With the increase of dietary Ca and P levels, chest girth of foals declined by a certain extent. Moreover, plasma calcitonin content of foals in the group I was significantly higher than that of groups II, III and IV with an increase of 34.24%, 24.89% and 23.64% (*P*<0.05), respectively. In conclusion, increasing dietary Ca and P levels can improve the milk yield of *Yili* mares, but reduce the milk Ca content. Dietary Ca and P levels do not affect the milk composition, but increase SFA and reduce USFA contents in milk fat. Lower milk Ca content may decrease plasma calcitonin content of foals, and hence slow the chest girth development of foals.

Key words: mares; calcium; phosphate; milk composition; fatty acid; foals